LA FÍSICA AL ENCUENTRO DE LA COMPLEJIDAD

ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura
CLXXXIII 728 noviembre-diciembre (2007) 889-898 ISSN: 0210-1963

Miguel A. F. Sanjuán
Grupo de Dinámica No Lineal y Teoría del Caos
Universidad Rey Juan Carlos
28933 Móstoles, Madrid

ABSTRACT: *With regard to the commemoration of the World Year of Physics 2005 a panoramic view of the physics of the complex systems is presented, that constitutes a new frontier of Physics whose origins go back to the beginning of the XX century, but whose influence and development are ventured like a very fruitful field of the science of XXI century.*

KEY WORDS: *Einstein, complex systems.*

RESUMEN: A propósito de la conmemoración del Año Mundial de la Física 2005 se presenta una visión panorámica de la física de los sistemas complejos, que constituye una nueva frontera de la Física cuyos orígenes se remontan a comienzos del siglo XX, pero cuyo influjo y desarrollo se aventuran como un campo muy fructífero de la ciencia del siglo XXI.

PALABRAS CLAVE: Einstein, sistemas complejos.

1. Introducción

Celebramos el Año Mundial de la Física, en el que se conmemora el centenario de la publicación de algunos de los más brillantes artículos de Albert Einstein, quien realizó contribuciones fundamentales a dos de las fronteras científicas del siglo XX. Por un lado, su Teoría de la Relatividad nos ayudó a entender el mundo a escalas cósmicas y por otro lado sus ideas sobre el efecto fotoeléctrico prepararon el camino para comprender el mundo microscópico de los fenómenos cuánticos. Hace tan sólo unos años, en 2001, se celebró en Calcuta, India, la *2nd Einstein Days International Conference: Millenial Vistas on Interdisciplinary Study of Complexity in Man, Nature and Reality,* que tuvo lugar en el Einstein Bhavan (Instituto Einstein) de la Universidad Visva Bharati. Y en dicha conferencia en la que se unía a la figura de Einstein el paradigma de la complejidad, se afirmaba que si Einstein viviera hoy, muy probablemente elegiría explorar la nueva frontera de los sistemas complejos. Y esto tiene sentido, ya que se trata de una parte de la Física, la Física de los Sistemas Complejos, que está teniendo un empuje muy notable en estos momentos, incluyendo nuevas líneas de investigación y aportando una nueva forma de hacer las cosas.

Precisamente, y durante el año 2005, conmemorando el Año Mundial de la Física, se celebró durante el mes de julio la XIII Conferencia General de la European Physical Society, "Beyond Einstein - Physics for the 21st Century" en la ciudad suiza de Berna. La conferencia se organizó en torno a tres conferencias temáticas paralelas, que de una u otra manera se relacionan con el trabajo científico de Albert Einstein:

1. Fotones, Láseres y Estadística Cuántica.
2. Relatividad, Materia y Cosmología.
3. Movimiento Browniano, Sistemas Complejos y Física en Biología.

Es justamente esta última, relacionada con el movimiento browniano, la física de los sistemas complejos y las relaciones de la Física y la Biología, donde algunas de las ideas de Einstein, o al menos problemas relacionados, se han desarrollado de una manera espectacular en la Física de los últimos años, dando lugar a una nueva física llamada de sistemas complejos o simplemente complejidad.

2. Orígenes de la complejidad

Es cierto que muchas de las nociones conceptuales que pueden definir a los sistemas complejos, tal y como los entendemos hoy día, no existían en la época de Einstein. Sin embargo, a pesar de que para muchos sea una noción relativamente nueva, tal y como suele ocurrir, los orígenes se



remontan a épocas muy anteriores. En cuanto a los orígenes de la *complejidad*, resulta de especial interés la figura del científico americano Warren Weaver (1894-1978) [1], que entre otras cosas fue coautor junto con Claude E. Shannon del famoso libro *The Mathematical Theory of Communication* publicado por The University of Illinois Press en 1949.



Figura 1. Warren Weaver (1894-1978).

Pues bien, en 1948 publicó un interesantísimo artículo, considerado fundacional, titulado *Science and Complexity* en la revista americana American Scientist **36,** 536 (1948) [2]. De hecho utilizó material que había sido publicado en 1947 y lo más importante es que resulta premonitorio de muchos aspectos de la complejidad de los que se vienen hablando en los últimos años. Su lectura es altamente recomendable.

Muchos físicos conocen al científico americano Ralph Abraham por su célebre libro *Foundations of Mechanics* [3], que escribió junto con Jerrold E. Marsden en 1967. Durante muchos años ha sido una referencia básica monumental sobre los fundamentos matemáticos de la mecánica. Recientemente escribió una interesante monografía, *The Chaos Avant-garde*, 2001 [4], en la que recoge las memorias de algunos de los pioneros de la teoría del caos. Su interés por las matemáticas, la física y por la historia, le ha llevado también a escribir un interesante ensayo sobre los orígenes de la complejidad [5].

Según él, los pilares en los que se fundamenta la teoría de la complejidad son tres: la cibernética, la teoría general



Figura 2. Ralph Abraham.

de sistemas (biología matemática) y la teoría de sistemas dinámicos (dinámica no lineal). En dicho artículo da una visión panorámica muy amplia del mundo de la complejidad en sus múltiples facetas, tal y como se ha desarrollado a lo largo del siglo XX.

3. Física y emergencia

Una de las ideas fundamentales en complejidad es la idea de *emergencia.* En Física existen numerosos ejemplos de sistemas donde se hacen evidentes las propiedades emergentes. Entre otros, la superconductividad y la superfluidez constituyen dos ejemplos de propiedades emergentes en Física. Cabe además señalar que existe toda una investigación de carácter fundamental, que pretende investigar los fenómenos complejos, donde en lugar de acudir al reduccionismo, que ha sido la idea fundamental que ha regido la evolución de la Física en los últimos años, la propiedad fundamental es la emergencia. Además, una cuestión fundamental es que estos fenómenos complejos emergentes no se derivan de las leyes microscópicas subyacentes. Y ésta es clave.

Algunas de estas ideas fueron expuestas de una manera magistral por el físico Philip W. Anderson, premio Nobel de Física de 1977, en un artículo publicado en la revista Science en 1972 y que lleva por título *More is different,* Science, **177,** 393-396, [6] donde deja muy claro la idea de que *"a cada nivel de complejidad aparecen propiedades completamente nuevas, y la comprensión de estos nuevos comportamientos requiere investigación que entiendo tan fundamental en su naturaleza como cualquier otra".*



SCIENCE

More Is Different

Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science.

P. W. Anderson



Figura 3. Philip W. Anderson, premio Nobel de Física de 1977 y portada del artículo publicado en Science, *More is Different.*

Algunos aspectos de la física de los sistemas complejos son también introducidos por Philip W. Anderson en un artículo titulado *Physics: The Opening to Complexity*, que fue publicado en la revista de la Academia de Ciencias Norteamericana Proceedings of the Nacional Academy of Sciences of the USA **92,** 6653-6654 (1995) [7], donde señala entre otras cosas: *"Pero otro gran número se dedican a otro tipo de investigación fundamental: investigación de fenómenos que son demasiado complejos de ser analizados de modo sencillo por simple aplicación de las leyes fundamentales. Estos físicos están trabajando en otra frontera entre lo misterioso y lo entendido: la frontera de la complejidad. En esta frontera, el lema no es el reduccionismo sino la emergencia. Los fenómenos complejos emergentes bajo ningún concepto violan las leyes microscópicas, sin embargo no aparecen como consecuencias lógicas de estas leyes."*

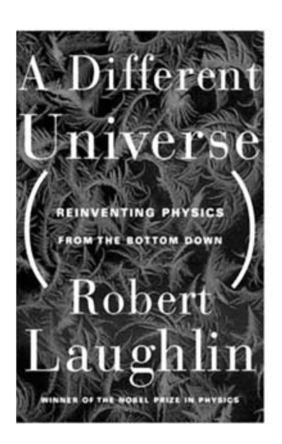




Figura 4. Robert Laughlin, premio Nobel de Física de 1998, y portada del libro *A Different Universe: Reinventing Physics from the botton down.*

Otro físico digno de ser reseñado en relación a la Física Emergente es Robert Laughlin, premio Nobel de Física de 1998 y profesor en la Universidad de Stanford, quien acostumbraba a proponer a sus mejores estudiantes el problema de deducir las leyes de la superfluidez a partir de primeros principios, a sabiendas de que es imposible. Y precisamente para mostrar la importancia de las propiedades emergentes en Física.

Ésta es la tesis fundamental de su reciente libro *A Different Universe: Reinventing Physics from the botton down* (Basic Books, 2005) [8], de la que el propio Philip W. Anderson escribió una sustanciosa reseña en Nature. [9]

El libro se fundamenta en un interesante artículo también publicado en el Proceedings of the Nacional Academy of Sciences **97,** 28-31 (2000) [10] titulado *The Science of*

Everything, donde entre las muchas cuestiones que señala podemos destacar las dos siguientes:

> "*La tarea central de la física teórica de nuestro tiempo ya no es escribir las ecuaciones últimas sino más bien catalogar y entender el comportamiento emergente en sus muchas formas incluyendo potencialmente a la misma vida. Llamamos a esta física de nuestro siglo el estudio de la materia compleja adaptativa. Para mejor o peor estamos ahora presenciando una transición de la ciencia del pasado, tan íntimamente ligada al reduccionismo, al estudio de la materia compleja adaptativa, firmemente basada en el experimento, con la esperanza de suponer un salto para nuevos descubrimientos, nuevos conceptos y nueva sabiduría*".

> "*El final del reduccionismo es una llamada para todos aquellos que estamos preocupados de la salud de las ciencias físicas para afrontar la verdad de que en muchos casos el ideal reduccionista ha llegado a sus límites como principio motor. Más que una teoría del todo, parece que nos enfrentamos a una jerarquía de teorías de las cosas, cada una de ellas emergiendo de su padre y evolucionando hacia sus hijos a medida que la escala de la energía disminuye. El fin del reduccionismo no es, sin embargo, el fin de la ciencia, ni siquiera el fin de la física teórica*".

Asimismo el premio Nobel de Física 2004, David Gross, organizó una conferencia sobre el Futuro de la Física en la Universidad de California en Santa Bárbara en 2004 [11], donde dos de las líneas prioritarias que señala son la *Materia Viva: Neurofísica, Redes Biológicas & Física en Biología* y por otro lado *Materia Compleja: materia blanda, formación de patrones, transiciones de fase.* Todos ellos campos muy relacionados con la ciencia de los sistemas complejos.

La complejidad del mundo supone un enorme contraste con la simplicidad de las leyes de la física. Éste es quizás uno de los aspectos más llamativos de la física: la simplicidad de sus leyes. Tanto las ecuaciones de Maxwell del Electromagnetismo, como la ecuación de Schrödinger de la Mecánica Cuántica, así como la ecuación de Newton de la Mecánica Clásica se pueden escribir en unas simples líneas. Como indicaron en un trabajo publicado en Science en 1999 titulado *Simple lessons from Complexity*, Science **284,** 87-89 (1999) [12] los físicos Nigel Goldenfeld de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign y Leo P. Kadanoff de la Universidad de Chicago de modo irónico: *Todo es simple y ordenado –excepto, por supuesto, el mundo.*

De hecho, cuando uno mira al mundo lo que uno observa es de una complejidad asombrosa. Si bien, no existen por el momento leyes de la complejidad, tal y como existen las leyes de la física, los autores antes citados enumeran una serie de lecciones sencillas sobre complejidad que se derivan del análisis y la observación de numerosos sistemas complejos que existen en el universo.

En el ensayo publicado en *Nature*, "The bigger picture", *Nature* **418,** 131 (2002) [13], por el físico húngaro Tamas Vicsek del Departamento de Biofísica de la Universidad Eötvös de Budapest, se argumenta que cuando un concepto no está bien definido, como es el caso de la complejidad, se corre el peligro de abusar de él. Se trata de un término que puede ser usado de modo indiscriminado como signo de modernidad, y del que no hay teoría alguna que lo sustente. En cualquier caso en este interesante ensayo queda de manifiesto, entre otras cosas, una de las principales ideas asociadas a las ciencias de la complejidad: *Que las leyes que describen el comportamiento de los sistemas complejos son cualitativamente diferentes de las que gobiernan las unidades de que están compuestos.*

4. Complejidad y fronteras de la física

Podríamos de alguna manera visualizar los diferentes ingredientes de la Física en términos de escalas, de tal modo que podríamos situar a la cosmología en la zona de las grandes escalas, a la física de partículas elementales en la zona de las escalas pequeñas y entre medias existe una gran zona intermedia, donde podrían situarse muchos de los aspectos relacionados con la física de los sistemas complejos. Aquí cabrían un amplio espectro de temas como transiciones de fase, fenómenos fuera del equilibrio, fenómenos de autoorganización, formación de patrones, sistemas heterogeneos, fenómenos biológicos de distintas naturalezas, física del procesamiento de la información, etcétera. Estas ideas, sin ser exhaustivas, ni únicas, dada la naturaleza de los fenómenos complejos, pueden visualizarse en la Figura 5.

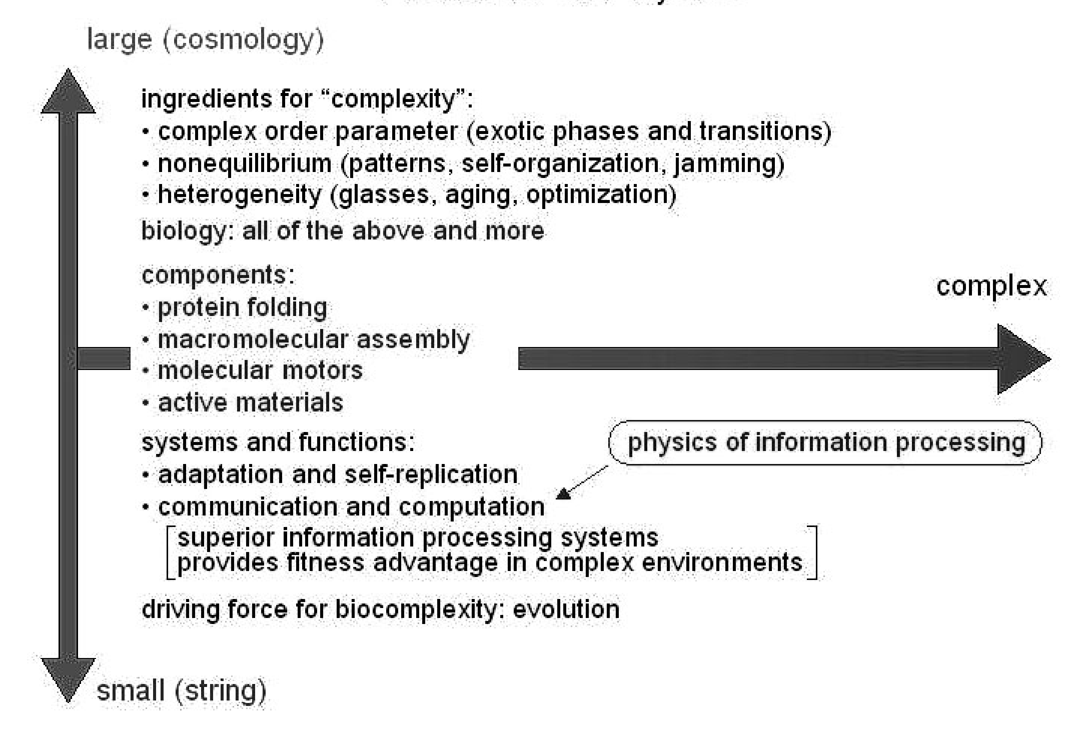


Figura 5. Diagrama sobre las Fronteras de la Física teniendo en cuenta las escalas. Entre las escalas de lo muy grande y lo muy pequeño, se sitúa el mundo de la complejidad.

A modo de palabras clave, voy a mencionar una serie de conceptos y problemas relacionados con la física de los sistemas complejos que suelen estar en la base de mucha fenomenología aplicada a sistemas particulares. Entre los muchos que podrían citarse, se encuentran la dinámica caótica, las estructuras fractales, la formación de patrones, la dinámica neuronal y neurofísica, las redes de regulación genética en el contexto de campo emergente que se denomina *biología sintética* y la teoría de redes complejas, con aplicaciones en multitud de disciplinas de naturalezas diversas.

Por otro lado, la complejidad suele estar muy relacionada con problemas de naturaleza intrínsecamente interdisciplinares, de donde surge el concepto de Ciencia Aplicada Teórica. De tal modo, que la complejidad induce una nueva relación entre la ciencia teórica y la aplicada. En el pasado, en la medida en que la tecnología actuaba sobre objetos físicos, la ciencia aplicada era fundamentalmente ciencia experimental aplicada a situaciones de la vida real. Hoy, cuando la tecnología actúa sobre la información, la ciencia aplicada consiste frecuentemente en operaciones teórico-abstractas aplicadas a temas de la información de la vida real. De este modo deberíamos acostumbrarnos a la expresión *Ciencia Aplicada Teórica.* Esta reflexión, debida al físico israelí Sorin Solomon [14], profesor de la Hebrew University of Jerusalen, es muy aplicable al mundo de la neurociencia, así como el de la biología sintética y las redes genéticas, entre otros campos de la complejidad.

Un esquema de las relaciones entre muchas de las ciencias particulares, la interdisciplinariedad y la ciencia de los sistemas complejos aparece en la Figura 6 [15].



COMPUTERS
Arrays (co)evolution
Robots
NETWORKS
Mobile Nodes Internet
Traffic Percolation
SOCIAL SCIENCE
Crowds
Markets
Microsimulation
Companies
Institutions
COGNITION
Language; Vision; Brain
Neural Nets
Reaction Diffusion
AGENTS
Statistical Mechanics and Phase Transitions
Spatially extended Systems
Stochastic Processes
Scaling
Localization, Emergence
GLASSES
Error correcting codes
NP-complete
NON-LINEAR DYN
Chaos
BIOLOGY
Swarms
Colonies
Brain
Immunology
Genetics, Proteomics
ECONOMICS
Behavioral Finance
Auctions
Games
MATHEMATICS
Renormalization
Multiscale

Figura 6. Esquema de las relaciones entre muchas disciplinas particulares y la complejidad [15].

Muchos consideran a la Física como el fundamento de las otras ciencias básicas, ya que todos los objetos naturales que nos rodean, incluidos nosotros mismos, están hechos de las mismas partículas elementales cuyas interacciones conoce e investiga la Física. En gran medida, el extraordinario éxito de la aproximación reduccionista de la física actual se fundamenta en el concepto de sistema aislado.

Figura 7. George F. R. Ellis.

Sin embargo no existe ningún sistema físico o biológico que sea aislado. Los sistemas biológicos son abiertos y en el mundo real el entorno importa tanto como las leyes. La aproximación física tiende a ignorar los elementos cruciales de la emergencia en la complejidad biológica, de tal modo que se produce una estructura jerárquica, en donde existen unas leyes fenomenológicas en cada uno de los niveles de la jerarquía. Los niveles más altos emergen de las leyes de la física subyacentes estableciendo posibles vías de crear la funcionalidad biológica, pero estas leyes son independientes de la física subyacente, lo cual explica el hecho de que los biólogos no necesiten estudiar ni teoría cuántica de campos, ni el modelo estándar de las partículas elementales, ni física nuclear.

Como señala George F. R. Ellis, prestigioso cosmólogo relativista, coautor junto con Stephen Hawking de la famosa obra *The Large Scale Structure of Space Time* (Cambridge University Press, 1973), y actualmente catedrático de Matemática Aplicada y de Sistemas Complejos de la Universidad de la Ciudad del Cabo en Sudáfrica, la física actual no incluye en su descripción de la realidad la *intencionalidad* que resulta de la existencia de ciertos objetos, coincidiendo con Philip W. Anderson en su visión de la complejidad. En su artículo reciente "Physics, Complexity and Causality", *Nature* **435,** 743 (2005) [16], concluye que el reto de la física consiste en desarrollar una descripción realista de la causalidad en estructuras complejas jerárquicas reales.

5. Fractales y caos: Japan Prize 2003 sobre complejidad

La naturaleza está llena de formas geométricas complejas tales como las líneas de las costas, estructuras de los ríos, las formas biológicas e incluso las curvas complejas de los mercados financieros. Existe una característica común en tales formas complejas, que es la autosemejanza. Esta es la propiedad que consiste en que cuando una parte de esta

forma se aumenta aparece el mismo tipo de estructura. Esta propiedad fue descubierta por Benoit Mandelbrot y es una propiedad universal que poseen muchas formas geométricas complejas y que denominó "fractal". Por otro lado, existen numerosos patrones dinámicos en la naturaleza tales como el movimiento de los planetas, la turbulencia en el agua y en el aire, variaciones de las poblaciones de las especies en sistemas ecológicos y otros muchos ejemplos. Estos patrones se describen mediante ecuaciones de evolución no lineales y James Yorke encontró el mecanismo universal que subyace a estos fenómenos no lineales. Lo llamó "caos", y a lo largo de décadas ha intentado descubrir y enunciar sus propiedades matemáticas. Ambos investigadores encontraron que los fractales y el caos son estructuras universales que se encuentran en los sistemas complejos. El Japan Prize lo concede cada año el gobierno japonés a través de la Fundación de la Ciencia y Tecnología del Japón. A diferencia del premio Nobel, cada año se elige un tema diferente. Y en el año 2003 se concedió para la Ciencia y la Tecnología de la Complejidad. El premio fue concedido a los científicos Benoit Mandelbrot por sus aportaciones a los fractales y a James A Yorke por sus notables contribuciones a la fundamentación de la teoría del caos. Este premio ha tenido una especial importancia para la comunidad de científicos que trabajan en estos campos, ya que se trata de la primera vez que se concede un premio de esta envergadura a científicos trabajando en temas de ciencias de la complejidad.



Figura 8. Ceremonia de entrega del Japan Prize en el Teatro Nacional de Tokio.

Para aquellos interesados en más detalles los pueden encontrar en el artículo "Conceptos Universales en Física No Lineal: Caos y Fractales. Japan Prize 2003" publicado en la *Revista Española de Física* [17] o en *Caos y Fractales: Conceptos Universales de la Ciencia de la Complejidad. Japan Prize 2003* publicado en la Gaceta Matemática de la Real Sociedad Española de Matemáticas [18].

Posiblemente una de las ideas más profundas acerca de la naturaleza de lo que se conoce como comportamiento caótico o simplemente caos, sea la idea de *dependencia sensible a las condiciones iniciales.* Es decir, las trayectorias de un sistema caótico se alejan una de otra a medida que avanza el tiempo cuando parten de puntos iniciales muy próximos. Este hecho tiene consecuencias muy drásticas en la capacidad de predicción de un sistema.

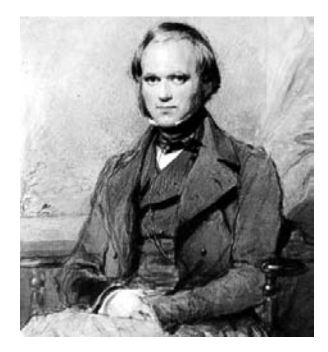


Figura 9. Charles Darwin.

Resulta sorprendente leer a Charles Darwin en el capítulo XIV de El Origen de las Especies (1859) [19] la frase: "*Nacen más individuos que los que pueden sobrevivir. Un grano en la balanza puede determinar qué individuos hayan de vivir y cuáles hayan de morir, qué variedad o especie haya de aumentar en número de individuos y cuál haya de disminuir o acabar por extinguirse*", que esconde la verdadera noción de dependencia sensible a las condiciones iniciales.

5. Complejidad e interdisciplinariedad

En los últimos años se ha hablado mucho de diálogo entre disciplinas como fuente de inspiración de nuevos problemas y nuevas soluciones. Para el estudio de la complejidad este es uno de los elementos fundamentales, ya que aunque contando con metodologías varias, su objeto de estudio abarca problemas relacionados tanto con las llamadas ciencias duras como con las blandas. Sistemas complejos existen en biología, en química, en física, en

sociología, en economía, etc. Se habla mucho, sin entender muchas veces de lo que se está hablando, de interdisciplinariedad, de multidisciplinariedad, de pluridisciplinariedad, de transdisciplinariedad. Con frecuencia usándolos como sinónimos, cuando cada uno de los términos anteriores tiene significados precisos muy diferentes. Sin embargo sigue faltando el verdadero diálogo entre disciplinas necesario para el avance en el conocimiento de los sistemas complejos en particular y de la ciencia en general.

La primera edición de *Thinking in Complexity* del profesor de filosofía de la ciencia de la Universidad de Augsburgo Klaus Mainzer, apareció publicada por la editorial Springer en 1994. En 2004 apareció la cuarta edición bajo el título: *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind, 4th ed.* Se trata por tanto de un éxito editorial de una monografía que pretende conceptualizar algunas de las ideas que se han venido desarrollando en los últimos años en torno a la complejidad y a la no linealidad en su relación con la materia, con la vida, con el cerebro y la inteligencia artificial y con la sociedad. El profesor Mainzer es actualmente el Presidente de la Sociedad Alemana de Sistemas Complejos y Dinámica No Lineal.

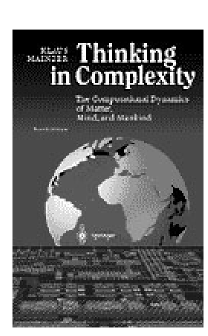


Figura 10. Portada del libro Thinking in Complexity de Klaus Mainzer.

Muchas de las ideas y conceptos de la ciencia de los sistemas complejos suponen un auténtico reto para la integración de diversas disciplinas. Entre ellas podríamos citar a la dinámica no lineal y la teoría del caos, la física estadística, la teoría de la información y de los sistemas, diversas áreas y métodos de la ingeniería, la ciencia de las redes complejas y la biología de sistemas. Este listado naturalmente no es completo, pero da una idea del reto que hay detrás de la idea de la complejidad. Esta idea pretende significar algo más que la idea de cruzar las fronteras disciplinares, la transdisciplinariedad y la interdisciplinariedad: integrar.

6. Premios Nobel y complejidad

En esta exploración sobre el encuentro de la Física y la Complejidad, resulta de gran interés el analizar el papel que han jugado prominentes físicos y científicos que han merecido el más alto galardón científico que supone el premio Nobel. Podemos empezar por el físico austriaco Erwin Schrödinger, premio Nobel de Física de 1933; conocido sobre todo por sus contribuciones a la Mecánica Cuántica. No en vano la ecuación fundamental de la Mecánica Cuántica lleva su nombre, la ecuación de Schrödinger. No obstante, sus intereses científicos y sus inquietudes personales fueron muy numerosos [20]. En 1943, pronunció una serie de conferencias en el Trinity College de Dublin, donde vivía en esos momentos, sobre el tema *¿Qué es la vida?* Posteriormente, en el año 1944, Cambridge University Press editó estas conferencias en forma de libro bajo el titulo: *¿Qué es la vida?* [21]. Como se ha comentado en numerosas ocasiones, la influencia de Schrödinger en el desarrollo de la incipiente biología molecular fue notable. Tanto es así que el joven James Watson se decidió en su aventura por la biología molecular tras la lectura del libro de Schrödinger. Estas preguntas de carácter fundamental, tan familiares en la tradición de la física, siguen teniendo una gran influencia en la pregunta clave sobre los fundamentos y las claves de la vida. El físico Max Delbrück (1906-1981), fue pionero en estudios en Biología Molecular y merecedor del premio Nobel de Medicina en 1969. Ya hemos mencionado anteriormente a Philip W Anderson, premio Nobel de Física de 1977. Pero también hay que citar a Murray Gell-Man [22], premio Nobel de Física de 1969; y sus trabajos en los últimos años en el Instituto de Santa Fe de Sistemas Complejos. Otro científico que hay que reseñar es sin duda a Ilya Prigogine, premio Nobel de Química de 1977. El también físico y premio Nobel de Física de 1973 Leo N. Cooper, se dedica a estudios del cerebro desde hace varias decadas. También el premio Nobel de Física de 1922, el danés Niels Bohr (1885-1962), se ocupó de temas relacionados con la biología y las ciencias de la vida. El premio Nobel de Física de 1991 Pierre Gilles de Gennes, que también se interesa por problemas del cerebro. De hecho la Beller Lecture del

March Meeting de la American Physical Society de 2006 fue impartida por Pierre-Gilles de Gennes, bajo el título *The Nature of Memory Objects in the Brain.* Por último citar también a Georges Charpak, premio Nobel de Física de 1992 y las contribuciones de sus trabajos a las imágenes médicas y en general a la ingeniería biomédica.





Figura 11. Erwin Schrödinger y su libro ¿Qué es la Vida?

7. Conclusiones

En el presente artículo se ha pretendido dar una visión panorámica de las relaciones entre la Física y la complejidad, a propósito de la conmemoración del Año Mundial de la Física. Una de las principales ideas que habría que destacar es que a pesar de que la Física de Sistemas Complejos suponga ahora mismo una de las fronteras de la investigación física actual, las ideas de la complejidad se remontan a comienzos del siglo XX, y se han venido desarrollando por diversos caminos hasta llegar a la visión que tenemos de ellas hoy día, si bien su evolución y desarrollo a lo largo del presente siglo XXI se encuentra bastante abierto.

La idea de emergencia frente al reduccionismo es otra de las ideas fundamentales en la física de los sistemas complejos. Algunas de estas ideas sobre emergencia se remontan incluso hasta la los orígenes de la Termodinámica, pero aparecen en diversos fenómenos que estudia la ciencia.

Se mencionan de una manera especial conceptos como el caos y los fractales que han supuesto un mecanismo catalizador de muchas de las ideas alrededor de las cuales se mueve la complejidad.

Otro aspecto de interés notable es la idea de la interdisciplinariedad, ya que en cierto sentido la complejidad tiene una llamada a integrar disciplinas así como a romper las tradicionales barreras disciplinares.

Por último se ha querido dejar constancia de que muchas de estas ideas han estado latiendo en el pensamiento y la acción de muchos físicos en el pasado y en el presente, entre los que se ha querido hacer un especial hincapié a una serie de premios Nobel, que han estado abiertos a problemas sobre la complejidad de la vida y de la naturaleza.

REFERENCIAS

[1] Unas notas biográficas sobre Warren Weaver pueden verse en: http://www-history.mcs.stand.ac.uk/%7Ehistory/Mathematicians/Weaver.html

[2] "Science and Complexity", en *American Scientist*, **36,** 536 (1948). Dicho artículo puede encontrarse en http://www.ceptualinstitute.com/genre/weaver/weaver-1947b.htm

[3] Ralph Abraham and Jerrold E. Marsden. *Foundations of Mechanics*, Addison Wesley Publishing Company; 2nd Rev edition (1994).

[4] Ralph H. Abraham (Editor), Yoshisuke Ueda (Editor). *The Chaos Avant-Garde: Memoirs of the Early Days of Chaos Theory*, World Scientific Publishing Company (2001).

[5] El ensayo *The Genesis of Complexity* escrito por Ralph Abraham puede encontrarse en: http://www.escet.urjc.es/%7Efisica/msanjuan/complejidad/Ralph_Abraham_complexity.pdf



[6] Philip W. Anderson. *More is different*, *Science*, **177,** 393-396 (1972). Una copia puede encontrarse en: http://www.escet.urjc.es/%7Efisica/msanjuan/complejidad/anderson_science72.pdf

[7] Philip W. Anderson. *Physics: The Opening to Complexity.* Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA **92,** 6653-6654 (1995). Una copia puede encontrarse en: http://www.pnas.org/cgi/reprint/92/15/6653

[8] Robert Laughlin. *A Different Universe: Reinventing Physics from the botton down* (Basic Books, 2005).

[9] http://www.escet.urjc.es/%7Efisica/msanjuan/complejidad/anderson_nature2005.pdf

[10] R. B. Laughlin and David Pines. *The Science of Everything*, Proceedings of the National Academy of Sciences **97,** 28-31 (2000). Una copia puede obtenerse en: http://www.pnas.org/cgi/reprint/97/1/28

[11] http://online.itp.ucsb.edu/online/kitp25/

[12] Nigel Goldenfeld and Leo P. Kadanoff. *Simple lessons from Complexity, Science*, **284,** 87-89 (1999). Una copia puede obtenerse en http://complexsystems.mccormick.northwestern.edu/papers/Kadanoff.pdf

[13] Tamas Vicsek. *The bigger Picture*, Nature **418,** 131 (2002). http://www.escet.urjc.es/%7Efisica/msanjuan/complejidad/complex_vicsek.pdf

[14] http://www.complexity-research.org/

[15] Sorin Solomon and Eran Shir. *Complexity; a science at 30*, Europhysics News, Vol. 34, No. 2 (2003). http://www.europhysicsnews.com/full/20/article4/article4.html

[16] George F. R. Ellis. Physics, "Complexity and Causality", *Nature*, **435,** 743 (2005). http://www.escet.urjc.es/%7Efisica/msanjuan/complejidad/nature_physics_complexity_june2005.pdf

[17] Miguel A. F. Sanjuán. "Conceptos Universales en Física No Lineal: Caos y Fractales. Japan Prize 2003", *Revista Española de Física*, **17,** 5-7 (2003). http://www.escet.urjc.es/~fisica/investigacion/publications/Papers/refjapan03.pdf

[18] Miguel A. F. Sanjuán. "Caos y Fractales: Conceptos Universales de la Ciencia de la Complejidad. Japan Prize 2003", *La Gaceta Matemática de la Real Sociedad Española de Matemáticas*, **6,** 81-88 (2003). http://www.escet.urjc.es/~fisica/investigacion/publications/Papers/gmrsmejapan03.pdf

[19] Charles Darwin. *The Origin of Species*, 1859. http://www.talkorigins.org/faqs/origin.html

[20] Walter Moore. *Erwin Schrödinger: una vida*, Cambridge University Press (1996).

[21] Erwin Schrödinger. *¿Qué es la Vida?*, Tusquets (2006).

[22] Murray Gell-Mann. *El quark y el jaguar*, Tusquets (1995).